



Modelo de ampliación de la capacidad productiva

Dusko Kalenatic¹

César Amílcar
López Bello²

Leonardo José
González Rodríguez³

RESUMEN

Este artículo es el resultado del proyecto de gestión de capacidades del Grupo de Sistemas Logísticos de la Universidad de la Sabana, en el cual se presenta un modelo de planeación estratégica para la ampliación de la capacidad productiva. La estructura del modelo proyecta a largo plazo la adquisición de máquinas y equipo en función de utilidad no percibida por la falta de capacidad para cubrir la potencialidad de la demanda.

La naturaleza estratégica del modelo proyecta las necesidades de infraestructura en lo relacionado a maquinaria y equipo para procesos de producción por etapas, toma en cuenta los requerimientos de fuerza laboral expresada como mano de obra polivalente, además, se dimensiona en cuanto a la disponibilidad de espacio físico requerido para la instalación de nueva maquinaria y equipo, sobre un horizonte temporal. En función de dicho horizonte, se analiza y evalúa el impacto de las decisiones de aumento de la capacidad.

Por simplicidad el modelo asume que por cada etapa de proceso se tienen iguales tecnologías, aunque es posible adecuarlo para contemplar diversas tecnologías por etapas de proceso.

Palabras clave: Gestión de la capacidad productiva, programación lineal.

A MODEL FOR EXPANDING THE PRODUCTIVE CAPACITY

ABSTRACT

This paper is the result of the project named “Integral models for capacity management”, in which a model of strategic planning for expanding the productive capacity is presented. The structure of this model projected in the long term involves the acquisition of machines and equipment, as a function of the utility that it is not perceived due to the lack of capacity to cover the potential demand. The strategic nature

of the model projects the needs of infrastructure related to the machines and equipment for the stages of a production process. Also, it takes into account the workforce requirements expressed as polyvalent labour, and it allows to calculate the space needed to install new machinery and equipment within a temporary horizon. With that horizon in mind, the impact of the decision-making on capacity expansion is analysed and evaluated. In order to simplify the model, the assumption of all stages of the process having the same technology is made, although it is possible to adjust the model to account for diverse technologies in different stages of the process.

Key words: Capacity planning, manufacturing capacity, linear programming.

1. INTRODUCCIÓN

El impacto del desarrollo tecnológico y la globalización de las economías, hace que las empresas formulen permanentemente estrategias conducentes al mejoramiento de su posición en un mercado altamente competitivo. Una de las actividades gerenciales a nivel estratégico que se ejecutan en los sistemas de producción es la proyección del crecimiento y desarrollo de su capacidad. El soporte de las decisiones de incremento de la actividad productiva se fundamenta en la necesidad de responder a las exigencias de nuevos mercados en cuanto a cantidad, calidad y servicio, además los impuestos por los requerimientos de una demanda potencial no satisfecha.

A menudo surgen cuestionamientos tales como: ¿cómo se debe ampliar la capacidad del sistema productivo y con qué estrategia?. ¿Es suficiente con la programación de tiempo extra, programando turnos adicionales, o es necesario ampliar la capacidad instalada adquiriendo nuevas máquinas y equipo, claro está, tomando en cuenta la capacidad de fuerza adicional para la manipulación de estos nuevos puestos de trabajo o es preferible maquilar

¹ Investigador Grupo de sistemas logísticos Universidad de la Sabana.

² Investigador del grupo de investigación MMAI de la Universidad Distrital. Universidad Católica de Colombia, Investigador grupo sistemas logísticos, Universidad de la Sabana.

³ Director Grupo de Investigación en Sistemas Logísticos, Universidad de la Sabana.

El término estrategia de desarrollo de la capacidad consiste en la formulación de alternativas de ampliación de la actividad productiva con la compra e instalación de nuevos equipos.

órdenes de producción?, ¿Será necesario adquirir nuevas tecnologías o comprar nuevas instalaciones?, ¿Es conveniente aumentar las operaciones, con nuevos productos y/o servicios?, ¿Comprar nuevas máquinas o habilitar nuevos puestos de trabajo?, ¿Apropiarse de nuevas tecnologías? ¿Se debe centralizar la producción en una planta grande o es mejor construir o habilitar varias plantas de producción o instalaciones pequeñas?. Todos estos cuestionamientos se abordan a nivel estratégico en la medida que se concibe la estrategia para desarrollar la capacidad de la organización.

La actividad productiva se ve afectada por las restricciones asociadas a la capacidad disponible de los recursos máquina y por la disponibilidad de la mano de obra contratada por la organización, es así como la formulación de la estrategia de ampliación de la capacidad, y los procesos de planeación y programación de las actividades productivas sobre un horizonte temporal se muestran como una de las temáticas más atractivas para la gestión de las operaciones.

Si bien la estrategia para desarrollar la capacidad es un plan de amplio alcance para satisfacer la demanda potencial de los productos y servicios que ofrece una organización [1], es necesario visualizar el proceso de crecimiento sobre un horizonte temporal.

La inversión en la adecuación y adquisición de instalaciones, desarrollo de nuevos productos y procesos de operación, aumento en el nivel de la fuerza laboral, compra de maquinaria y equipo son estrategias que por su importancia tienden a decidirse en los niveles jerárquicos más altos de las empresas. La adquisición de nuevas instalaciones y equipos son factores que afectan significativamente la competitividad de la empresa, si se tiene insuficiencia de capacidad no se puede responder rápidamente a las fluctuaciones de la demanda y por tanto, la pérdida de su nicho de mercado, esto se debe a que la ampliación de la capacidad es una decisión costosa e implica un tiempo considerable para habilitar los nuevos equipos a la producción [2].

De otra parte, la planeación de la producción a niveles estratégicos y tácticos requiere de la

planeación e identificación de la disponibilidad de la capacidad a mediano plazo sobre un horizonte de tiempo monitoreado, además de la estimación de los requerimientos de capacidad para realizar la provisión de los recursos necesarios para la actividad productiva.

La factibilidad técnica que tienen las máquinas y equipos para realizar determinados productos, así como el ordenamiento secuencial, los tiempos de alistamiento y el grado tecnológico de las operaciones de producción afectan y reducen significativamente la disponibilidad de la capacidad a corto plazo; en otras palabras, en el intento de materializar los planes de producción a largo y mediano plazo, en la programación al detalle, existe una diferencia importante que se debe tomar en cuenta para la planeación global de la capacidad.

2. ASPECTOS CONCEPTUALES SOBRE AMPLIACIÓN DE LAS CAPACIDADES PRODUCTIVAS

Para este aparte es conveniente introducir los conceptos de capacidad, nivel de actividad y de estrategia de desarrollo de la capacidad, así como su impacto sobre los procesos de planeación, programación y control de las actividades productivas.

Se entiende por **capacidad** el potencial de un trabajador, una máquina, un centro de trabajo, un proceso, una planta o una organización para fabricar productos por unidad de tiempo.¹

La capacidad productiva, su análisis, planeación, programación y control, constituyen actividades críticas que se desarrollan paralelamente con las actividades de programación y planeación de materiales, siendo la capacidad la cantidad de productos o servicios destinados a satisfacer las necesidades del cliente o de la sociedad que puede ser obtenida por una unidad productiva en un determinado periodo de tiempo [3].

Otros autores [4] la definen como el volumen de producción que se puede alcanzar en un

¹ Definición de la Sociedad Estadounidense de Control de Producción e Inventarios (APICS).

tiempo determinado, o como la velocidad máxima que un sistema puede realizar en un trabajo [5].

Por otra parte, el concepto de capacidad puede ser definido también en diferentes niveles jerárquicos de la organización, de acuerdo a los objetivos que en cada caso se persigan, es decir, a nivel global de todo el sistema productivo y de sus unidades estructurales, así como de las instalaciones, máquinas, equipos y puestos de trabajo. La capacidad de un proceso que genera una amplia variedad de productos por lo general se expresa como tasa de producción por unidad de tiempo.

Es complicado expresar la capacidad como tasa de producción cuando se producen diversidad de productos que requieren diferentes niveles de recursos; para tal situación la tasa de producción depende de la mezcla de productos y del tamaño de los lotes, así la capacidad puede medirse en unidades de recurso disponible.

Cuando un proceso requiere de operaciones en serie, su capacidad se determina por la operación cuya tasa de rendimiento tiene el nivel más bajo en la secuencia. La operación que limita la capacidad se denomina **operación cuello de botella**. Una forma de expresar la capacidad cuando se refiere a la disponibilidad de un recurso requerido para la producción de una mezcla de productos en un espacio de tiempo, puede ser la capacidad del recurso máquina, la cual se expresa en [horas- máquina al año], o la capacidad del recurso mano de obra expresada en [horas- hombre al año].

El término capacidad se relaciona a la potencialidad técnica y económica que posee un sistema u organización productiva o sus unidades estructurales, para participar en la elaboración de productos y/o prestación de servicios de una forma técnica, racional y económicamente eficiente, en un tiempo determinado.

La capacidad puede clasificarse en los siguientes tipos [6]:

- Aquella determinada por la potencialidad que tiene un sistema, unidad estructural, elemento, máquina o persona para realizar una determinada producción y/o servicio en

un lapso de tiempo dado la cual se denomina **capacidad técnica**, es decir, el máximo rendimiento posible que se puede obtener en su desempeño.

- Aquella definida en relación a los costos asociados a la producción en un horizonte temporal definido conocida como **capacidad económica**; en otras palabras, cuando la organización en su conjunto obtiene los menores costos por unidad de producción y/o servicio realizado, garantizándose así, el denominado óptimo técnico – económico [7].

La capacidad de los medios de producción o de los insumos estructurales, en general, puede también diferenciarse en función de la disponibilidad, requerimiento y utilización temporal. Así, aquella que está potencial y totalmente disponible para alcanzar los resultados productivos máximos especificados por un productor se denomina **capacidad instalada**. La magnitud de esta capacidad se ve solo disminuida por razones de mantenimiento de los medios de producción, requeridos para garantizar su propia disponibilidad y utilización en la actividad productiva [8]. Su medición se realiza para diferentes horizontes de tiempo.

La capacidad instalada es la cantidad de máquinas y equipo que una organización productiva posee y el potencial de producción que estos permiten alcanzar. La capacidad instalada representa la producción posible, si todas las máquinas y equipos estuvieran trabajando al 100 % del tiempo ininterrumpido [9]. A su vez, la capacidad instalada puede ser sostenida por muy cortos periodos de tiempo, así como pocas horas al día o pocos días al mes [10].

Es habitual denominar la capacidad de espacio físico como capacidad instalada para el almacenamiento de productos terminados, productos en proceso y materiales, así como para la instalación de nuevos equipos y puestos de trabajo.

Cuando la magnitud es inferior a la de la capacidad instalada y se toma en cuenta las condiciones asociadas a los factores de alistamiento de la producción, administración y organización, se trata entonces de la **capacidad disponible** la cual se calcula en función de los días hábiles, el número de turnos

programados y su longitud, considera las pérdidas de tiempo originadas por el ausentismo de los trabajadores, las originadas por factores organizacionales y por aquellos otros factores externos que de una u otra forma hacen que se disminuya la capacidad [11].

Las máquinas no se pueden usar a toda capacidad a lo largo del periodo de producción. Hay varias razones para que esto ocurra. La necesidad de instalación, mantenimiento preventivo, afilado de herramientas, fallas y reparaciones imprevistas reduce el tiempo disponible para la producción. Las máquinas con tecnología más antigua son susceptibles de averiarse que las nuevas, ocasionando así una menor productividad.

Factores relacionados con la fuerza laboral, como el ausentismo, los tiempos de para, las necesidades personales, el tiempo de valoración de lo producido, los ajustes, preparación y alistamiento de las máquinas y del material reducen la disponibilidad del recurso máquina. Debido a los requerimientos de calidad en los procesos de producción, existe cierta pérdida de capacidad inclusive cuando el equipo esté adecuadamente instalado y se opere correctamente. Además se pierde alguna producción al desechar algunas unidades defectuosas cuando la máquina esta operando mal o se produce incorrectamente produciéndose piezas con la calidad no deseada.

En ciertas situaciones se les asigna más de una máquina a un solo operario, lo cual se conoce como **acoplamiento de máquina**. Esto se determina dividiendo el tiempo de ciclo total en dos partes, a saber el tiempo de la máquina y el tiempo del trabajador. El **tiempo de máquina** es aquel en que la máquina está funcionando sin asistencia del operario, y el **tiempo del operario** es aquel en donde el trabajador está con la máquina inactiva, realizando por ejemplo actividades de alimentación y carga de las máquinas. Cuando el tiempo de máquina es relativamente más grande que el tiempo del trabajador es usual que en este tiempo de operación de la máquina el trabajador realice actividades de carga de otras máquinas. Por lo tanto es posible que a un operario se la asigne varias máquinas en su actividad productiva.

En el sistema de conversión, un problema de desperfecto en una máquina o una producción defectuosa puede afectar la producción de otras máquinas del proceso productivo. Así mismo, un operario ocupado en tratar de solucionar un problema o corregir una producción defectuosa puede descuidar las demás máquinas que requieren de su presencia para su funcionamiento.

El tiempo disponible para la producción no se incrementa en la misma proporción que el número de turnos; la programación de otro turno de producción no añade otras ocho (8) horas de producción. La pérdida de tiempo de producción aumenta, por que el tiempo libre disponible para reparaciones disminuye. Por ejemplo si en algún momento una máquina se avería, usualmente su reparación se realizaría en el segundo turno de trabajo, lo cual haría que se disminuyera el tiempo destinado para la producción de ese segundo turno. De otra parte factores como la falta de material, la falta de ayuda técnica, el ausentismo de los trabajadores afectan el rendimiento y la capacidad en mayor grado en el segundo turno, que en el primero. En general el grado de ausentismo es mayor en el segundo turno y aún más en el tercero.

Finalmente, un modelo de ampliación de capacidades se reporta en [6, pág.70] aunque solamente considera elementos de un solo periodo.

3. MODELO DE AMPLIACIÓN DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA

Para abordar el problema de planeación y desarrollo de la capacidad, se formula un modelo de ampliación de la capacidad instalada que fundamenta las decisiones que permita absorber demandas potenciales no satisfechas.

Con este modelo se pretende evaluar la viabilidad técnica y económica de ampliar la capacidad de producción con la adquisición de nueva maquinaria y equipo, así como la contratación de nuevo personal para cubrir las necesidades originadas por la consecución y habilitación de nuevos puestos de trabajo. En el se evalúa si es conveniente incrementar la capacidad instalada para cada etapa de proceso, dado que al aumentar la capacidad

es posible incrementar los niveles de producción y por lo tanto la contribución a la utilidad frente al incremento en los costos de amortización por la compra, instalación y puesta en funcionamiento de las nuevas máquinas y equipos.

3.1 Objetivo

Concretamente el propósito del modelo consiste en determinar un plan de ampliación de capacidades orientado a la maximización de la utilidad.

3.2 Función objetivo

De acuerdo a lo anterior, entonces la función objetivo queda estructurada en relación a los niveles de producción e inventario, en la decisión de comprar nuevas máquinas y equipo, y en la decisión de contratar nuevo personal requerido para la manipulación de los nuevos equipos.

Por otra parte, la función objetivo del modelo está estructurada para que en base a los márgenes de contribución se logre un incremento a partir de la producción adicional ocasionada por el aumento de la capacidad.

La utilidad está en función de las variables de producción, inventario, operarios a contratar y máquinas a adquirir como se expresa en la ecuación (1)

$$F = f(X_{j,t}, j=1, 2, \dots, J; t=1, 2, \dots, T; Oc_i; Y_i, i=1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

El criterio de maximización de la función utilidad y ampliación de la capacidad instalada se expresa como la relación (2)

$$\begin{aligned} \text{Max } F = & \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J (P_j - C_j) X_{j,t} - \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J h_{j,t} I_{j,t} - \\ & \sum_{i=1}^M A_i Y_i - CC \sum_{i=1}^M Oc_i - CF \end{aligned} \quad (2)$$

3.3 Conjuntos referenciales

i : Índice que identifica la etapa de proceso y el tipo de máquina, donde $i=1, 2, \dots, M$

j : Índice que identifica el tipo de producto, donde $j=1, 2, \dots, J$

t : Índice que identifica el periodo de producción, donde $t=1, 2, \dots, T$

M : Número de etapas de proceso o tipos de máquina

J : Número de tipos de producto

T : Número de periodos del horizonte de planeación.

3.4 Definición de variables de decisión

El modelo de ampliación de capacidades temporalizado presenta el conjunto de variables de decisión siguiente:

$X_{j,t}$: Cantidad a elaborar de producto tipo j , en el periodo t .

Y_i : Número de máquinas a adquirir del tipo i ,
 Oc_i : Número de operarios nuevos a contratar (polivalentes), en el periodo t .

$X_{j+i,t}$: Ocio productivo de la maquinaria tipo i , en el periodo t .

$X_{j+M+1,t}$: Ocio productivo del recurso mano de obra, en el periodo t .

$I_{j,t}$: Inventario disponible al final del periodo t del producto tipo j .

$dn_{j,t}$: Demanda no satisfecha de producto tipo j , en el periodo t .

3.5 Parámetros

C_j : Costo unitario de producción del artículo tipo j .

P_j : Precio de venta por unidad de producto tipo j .

CF : Costo Fijo

$dmax_{j,t}$: Demanda potencial del producto tipo j , en el periodo t .

$dmin_{j,t}$: Demanda requerida del producto tipo j , en el periodo t .

$Cd_{i,t}$: Capacidad disponible de la maquinaria en la etapa de proceso i , en el periodo t .

$Cdu_{i,t}$: Capacidad disponible por unidad de máquina en la etapa de proceso i , en el periodo t .

Kd_t : Capacidad disponible del recurso mano de obra, en el periodo t .

Kdo_t : Capacidad disponible por operario, en el periodo t .

$a_{i,j}$: Tiempo de elaboración estándar de un

producto tipo j en una máquina de la etapa de proceso i .

$b_{i,j}$: Tiempo de ejecución estándar requerido de mano de obra por unidad de producto tipo j en la etapa de proceso i .

A_i : Costo de amortización por la compra, instalación y puesta en marcha de una máquina tipo i .

CC : Costo de selección, contratación y capacitación de un operario nuevo.

Er_i : Espacio requerido para la instalación de una nueva máquina, considerando las áreas de trabajo para: alimentación de materia prima, manipulación del equipo y almacenamiento temporal de producto procesado en la etapa de proceso i .

Ed : Espacio disponible para la instalación de nuevos equipos.

$h_{j,t}$: Costo de mantenimiento de inventario por unidad de producto tipo j en el período t .

fs : Factor de servicio.

3.6 Condiciones iniciales

$I_{j,0}$: Inventario disponible al inicio del período de planeación de producto tipo j (de tal manera que es igual a una constante).

3.7 Restricciones del modelo

El modelo de ampliación de capacidades productivas toma como representativas cuatro tipos de restricciones: restricciones de capacidad disponible asociadas a la maquinaria y el equipo por etapas de proceso en intervalos de tiempo, ecuaciones (3-4), restricciones de capacidad asociadas a la mano de obra (bajo el supuesto de polivalencia) sobre un horizonte temporal, ecuaciones (5-6), restricciones de disponibilidad de espacio físico para la ubicación de nuevos puestos de trabajo e instalación de nuevos equipos y máquinas, ecuación (7), restricciones de demanda potencial y requerida, ecuaciones (8-9), restricciones de disponibilidad de espacio físico para la instalación y puesta en marcha de nuevas máquinas y equipos en sitios de trabajo, las condiciones lógicas de no negatividad para las variables de nivel de producción e inventario, ecuación (10), las relacionadas a la condición entera asociada a la contratación de fuerza

laboral y para la compra y adquisición de maquinaria y equipo, ecuación (11) y las condiciones iniciales sobre el estado de los inventarios disponibles de cada tipo de producto al comienzo del horizonte de planeación.

Las diferencias entre las expresiones (3) y (4) radican en que la segunda se expresa en forma estándar, agregando la variable de holgura, la cual expresa el ocio productivo en que puede incurrir los fondo de tiempo máquina sobre el horizonte temporal.

$$\sum_{j=1}^J a_{i,j} X_{j,t} - C du_i Y_i \leq C d_{i,t} \quad (3)$$

para $i = 1, 2, \dots, M$ y $t = 1, 2, \dots, T$

$$\sum_{j=1}^J a_{i,j} X_{j,t} - C du_i Y_i + X_{J+i,t} = C d_{i,t} \quad (4)$$

para $i = 1, 2, \dots, M$ y $t = 1, 2, \dots, T$

La expresión (5) indica como el nivel de actividad que se puede generar medido en unidades de fuerza laboral debe ser asociado a la disponibilidad del fondo de tiempo disponible del recurso humano, lo cual al ser estandarizado se observa en la expresión (6), que es el ocio productivo de la fuerza laboral asociado a la variable de holgura que se puede causar en la actividad productiva sobre el horizonte de planeación.

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^J b_{i,j} X_{j,t} - K d o_i \sum_{r=1}^I Oe_r \leq K d_i \quad (5)$$

para cada $t = 1, 2, \dots, T$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^J b_{i,j} X_{j,t} - K d o_i \sum_{r=1}^I Oe_r + X_{J+M+1,t} = K d_i \quad (6)$$

para cada $t = 1, 2, \dots, T$

La expresión (7) muestra como el espacio físico asignado para la instalación de nueva maquinaria y equipo se convierte en una restricción que trunca el desarrollo de la organización.

$$\sum_{i=1}^m Er_i Y_i \leq Ed \quad (7)$$

$$X_{j,t} + I_{j,t-1} - I_{j,t} + d n_{j,t} = d \max_{j,t} \quad (8)$$

$\forall j = 1, 2, \dots, J \quad \wedge \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$

$$X_{j,t} + I_{j,t-1} - I_{j,t} \geq d \min_{j,t} \quad (9)$$

$\forall j = 1, 2, \dots, J \quad \wedge \quad \forall t = 1, 2, \dots, T$

Las expresiones (8) y (9) indican como es posible cubrir la demanda en un periodo en particular a partir de los niveles de producción

y de inventario, dentro del rango mínimo (demanda requerida) y máxima (demanda potencial).

Las restricciones de capacidad disponible por grupo de sitios de trabajo (3) y (4), al igual que las restricciones de capacidad de mano de obra (5) y (6) se diferencian en la inclusión de las variables de holgura que representan en el primer caso (4) el ocio productivo de los medios de trabajo, y en el segundo (6) el ocio productivo del recurso mano de obra, esto con el fin de satisfacer diferentes objetivos en los modelos propuestos en este artículo. Diferentes autores [12] [13] realizan modificaciones a esta restricción con el fin de incluir la capacidad perdida en actividades de alistamiento, otros autores [14], [15] desagregan el lado derecho de la restricción por grupos de herramientas y/o centros de trabajo, así mismo analizan el impacto de cambios tecnológicos en la capacidad [16] [17] [18]. Así pues, el modelo de ampliación de capacidad productiva se puede resumir en la expresión (13).

$$X_{j,t}; I_{j,t} \geq 0 \quad \text{para } j=1,2,\dots,J \quad y \quad t=1,2,\dots,T \quad (10)$$

$$Y_i, Oc_i \geq 0 \quad \text{para } i=1,2,\dots,M \quad y \quad t=1,2,\dots,T \quad (11)$$

y enteras

$$I_{j,0} = Kte_j \quad \text{para } j=1,2,\dots,J \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{Max } F = & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J (P_j - C_j) X_{j,j} + \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J h_{j,j} I_{j,j} - \sum_{i=1}^M A_i Y_i - CC.Oc - CF \\ \text{Sujeto a:} \\ \text{Restricción de capacidad del recurso máquina y equipo} \\ & \sum_{j=1}^J a_{i,j} X_{j,j} - Cdu_i Y_i + X_{i,j,j} = Cd_{i,j} \quad \text{para } i=1,2,\dots,M \quad y \quad t=1,2,\dots,T \\ \text{Restricción de factor humano} \\ & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^J h_{i,j} X_{j,j} - Kdo_j \sum_{i=1}^M Oc_i + X_{j,M+1,j} = Kd_j \quad \text{para } t=1,2,\dots,T \\ \text{Restricción de Espacio Físico} \\ & \sum_{i=1}^M Er_i Y_i \leq Ea \quad (13) \\ \text{Restricción de demanda potencial} \\ & X_{j,t} + I_{j,t-1} - I_{j,t} + dn_{j,t} = d \max_{j,t} \quad \text{para } j=1,2,\dots,J \quad y \quad t=1,2,\dots,T \\ \text{Restricción de demanda requerida} \\ & X_{j,t} + I_{j,t-1} - I_{j,t} \geq d \min_{j,t} \quad \text{para } j=1,2,\dots,J \quad y \quad t=1,2,\dots,T \\ \text{Restricción de nivel de servicio} \\ & dn_{j,t} \leq (1 - fs) d \max_{j,t} \quad \text{para } j=1,2,\dots,J \quad y \quad t=1,2,\dots,T \\ \text{Restricción de punto de equilibrio} \\ & \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J (P_j - C_j) X_{j,j} + \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^J h_{j,j} I_{j,j} - \sum_{i=1}^M A_i Y_i - CC.Oc - CF \\ \text{Restricciones lógicas} \\ & X_{j,t}; I_{j,t} \geq 0 \quad \text{para } j=1,2,\dots,J \quad y \quad t=1,2,\dots,T \\ & Y_i, Oc_i \geq 0 \quad \text{para } i=1,2,\dots,M; \quad t=1,2,\dots,T \quad y \quad \text{enteras} \\ \text{Condiciones Iniciales} \\ & I_{j,0} = Kte_j \quad \text{para } j=1,2,\dots,J \end{aligned}$$

4. VALIDACIÓN

Con el fin de validar el modelo de ampliación de capacidades temporalizado y con base en la experiencia, se propone un caso que caracteriza la situación práctica. El caso muestra un análisis y una interpretación enriquecedora para los procesos de toma de decisiones en cuanto a la ampliación de la capacidad instalada.

Las empresas manufactureras plantean en sus planes estratégicos de desarrollo [19] la posibilidad de ampliar la capacidad productiva, para lo cual puede utilizar estrategias tales como la programación de tiempo extra, programación de nuevos turnos de trabajo, mediante la compra, instalación y habilitación de nuevos puestos de trabajo o el cambio o modificación tecnológica. Para tal fin, se presenta información relevante que identifica una organización.

La empresa elabora cuatro (4) familias o tipos de producto, a lo largo de tres (3) etapas de proceso, en donde hay varias máquinas (o puestos de trabajo) por etapa de proceso de la misma tecnología.

La empresa labora en un (1) turno de trabajo de ocho (8) horas, seis (6) días a la semana (de lunes a sábado), no labora días festivos y además programa vacaciones colectivas que corresponde a quince (15) días hábiles al año (7 días del mes de diciembre y ocho días del mes de enero).

Los tiempos de elaboración estándar, en minutos máquina por unidad de cada tipo de producto por tipo de máquina en cada etapa de proceso, el número de máquinas disponibles de cada tipo por etapa de proceso (N_j), las pérdidas de tiempo estándar ocasionadas por el mantenimiento preventivo de los equipos por unidad de máquina de cada tipo expresada en horas al año (g_j), el número de operarios requerido por puesto de trabajo o por tipo de máquina (Or_j), el costo de materia prima por unidad de producto (CMP_j), el costo de operación de una máquina de cada tipo en \$ por hora máquina (CO_j), el costo por unidad de cada tipo de materia prima, el inventario inicial disponible de cada tipo de producto ($I_{j,0}$), y el precio de venta por unidad de cada tipo de producto (P_j), se muestra en la Tablas I y II.

La empresa por razones de capacidad ha tenido que subcontratar y ha perdido oportunidad de vender sus productos, por eso ha decidido, realizar un análisis de capacidad para poder suplir las necesidades del mercado y así prestar un mejor servicio al cliente.

Tabla I. Datos de los parámetros del caso de estudio

ETAPA	PRODUCTO minutos/unidad			
	P1	P2	P3	P4
E1	15	14	12	11
E2	11	10	9	8
(CMP _j)	12200	13250	13200	14400
(P _j)	45180	46022	44772	45531
(I _{j,0})	500	250	420	285

Tabla II. Datos para estimar pérdidas de capacidad

ETAPA	N _i	g _i	Or _j	CO _i
E1	16	110	1	27380
E2	13	115	2	25870
E3	12	135	2	24750
Pérdidas de tiempo por factores organizacionales, ausentismo y factores externos				
G2=3500 horas/año G3=3200 horas/año G4=3300 horas/año				

La demanda mensual requerida proyectada para cada tipo de producto se muestra en la Tabla III.

Tabla III. Datos de demanda de los productos

Periodo	DEMANDA POR PRODUCTO			
	P1	P2	P3	P4
Enero	10510	9510	10210	5500
Febrero	11420	9820	11420	6550
Marzo	13300	8300	8800	6280
Abril	14560	12570	10560	7620
Mayo	15600	13680	8600	10600
Junio	16450	15420	9450	12450
Julio	13250	16250	10250	15240
Agosto	12300	15380	12300	16300
Septiembre	14640	14720	13640	17640
Octubre	15600	14640	17600	17600
Noviembre	15820	16620	18820	18820
Diciembre	16920	17320	20920	19920

La empresa cuenta con una planta de 96 operarios polivalentes, el tiempo de labor implica un 20% adicional para la manipulación de materiales y para el alistamiento de los equipos. El costo de mano de obra está determinado por el salario de cada trabajador los cuales son medianamente calificados y que corresponde a \$1'120.000.

El costo fijo anual de operación de la empresa sin tomar en cuenta alguna ampliación, los costos de contratación, los costos de amortización por la compra, adquisición e instalación de nuevos equipos, el área requerida para la instalación y funcionamiento de una máquina de cada tipo y el área disponible para la ubicación de nuevos puestos de trabajo se muestran en la Tabla IV.

Tabla IV. Datos adicionales para evaluar la ampliación de la capacidad.

Máquina	Costo de Amortización \$/año	Área requerida/ Máquina	Área disponible = 620 metros
M1	4'200.000	6 m ²	Costo de contratar = \$1'200.000/operario
M2	4'800.000	8 m ²	Costo fijo = \$1200.000.000/Año
M3	5'600.000	10 m ²	

El costo de mantenimiento del inventario es del 2% mensual cargado al costo del inventario promedio (es decir 2% mensual por el costo unitario del producto).

De la lectura del caso se resume que es necesario obtener planes orientados a la obtención de la máxima utilidad, además de realizar un análisis de ampliación de capacidad.

4.1 Solución

4.1.1 Determinación de parámetros

Para efectuar los cálculos de **capacidad del recurso máquina** de cada etapa de proceso en cada periodo de tiempo se recurre a la expresión (14).

$$Cd_{i,t} = (DH_t)(HT)(NT)(N_i) - \left(g_i + \frac{G_2 + G_3 + G_4}{\sum_{i=1}^M N_i} \right) \frac{N_i}{T} \quad \forall i \wedge \forall t \quad (14)$$

Donde:

DH_t : Días hábiles del periodo t , para $t=1, 2, \dots, T$.

HT : Horas turno.

NT : Número de turnos.

N_i : Número de máquinas o puestos de trabajo disponibles en la etapa de proceso i para $i=1, 2, \dots, M$.

g_i : Pérdidas de tiempo por la realización de mantenimiento programado por unidad de

máquina en la etapa de proceso i para

G_2 : Pérdidas de tiempo estándar ocasionadas por factores organizacionales

G_3 : Pérdidas de tiempo estándar ocasionadas por el ausentismo

G_4 : Pérdidas de tiempo estándar ocasionadas por factores externos

T : Número de periodos del horizonte de planeación

M : Número de etapas de proceso

Para efectuar los cálculos de **capacidad del recurso mano de obra** (polivalente) en cada periodo de tiempo se recurre a la expresión (15).

$$Kd_t = DH_t * HT * OD - \left(\frac{G_1 + G_2 + G_3 + G_4}{T} \right) \forall t \quad (15)$$

Donde las pérdidas totales por mantenimiento de los equipos se calculan como se muestra en la expresión (16)

$$G_1 = \sum_{i=1}^M g_i N_i \quad (16)$$

Donde:

OD : Número de operarios disponibles.

HT : Horas turno.

N_i : Número de máquinas o puestos de trabajo disponibles en la etapa de proceso i para $i=1,2,...,M$.

g_i : Pérdidas de tiempo por la realización de mantenimiento programado por unidad de máquina en la etapa de proceso i para $i=1,2,...,M$.

DH_t : Días hábiles del periodo t , para $t=1,2,...,T$.

G_1 : Pérdidas de tiempo estándar por mantenimiento preventivo.

G_2 : Pérdidas de tiempo estándar ocasionadas por factores organizacionales.

G_3 : Pérdidas de tiempo estándar ocasionadas por el ausentismo.

G_4 : Pérdidas de tiempo estándar ocasionadas por factores externos.

T : Número de periodos del horizonte de planeación.

M : Número de etapas de proceso.

Para calcular el **costo unitario** por tipo de producto, es necesario determinar los costos de operación por unidad de cada tipo de producto, el costo unitario de mano de obra y el costo de materia prima asociada a cada unidad de producto. Para tal efecto se utiliza la expresión (17).

$$C_j = CO_{.j} + CMO_j + CMP_j \quad \forall j \quad (17)$$

Donde:

$CO_{.j}$: Costo de operación por unidad de cada tipo de producto j .

CMO_j : Costo de mano de obra por unidad de cada tipo de producto.

CMP_j : Costo de materia prima por unidad de cada tipo de producto j .

Para el cálculo del **costo de operación** se utiliza la expresión (18)

$$CO_{.j} = \sum_{i=1}^M a_{i,j} CO_i \quad \forall j \quad (18)$$

Donde:

$CO_{.j}$: Costo de operación por unidad de cada tipo de producto j .

CO_i : Costo de operación por unidad de tiempo de una máquina en la etapa de proceso i .

$a_{i,j}$: Tiempo de elaboración estándar por unidad de cada tipo de producto j en una máquina en la etapa de proceso i .

4.1.2 Instrumentación

Se entiende como instrumentación la consecución de los diferentes recursos necesarios para conducir la experimentación.

El levantamiento de datos, la validación de la información de entrada para el modelo son procedimientos que están fuera del alcance del presente artículo. Para resolver el problema es necesario utilizar un algoritmo de programación entera mixta, como el CIPLEX. Por lo tanto, para la realización del proceso experimental se

utilizó el Software GAMS Versión 20.20.0 Módulo GAMS Rev 133 Windows NT/95/98, el cual tiene disponible el algoritmo CPLEX.

4.1.3 Análisis modelos de ampliación de capacidad

La opción de utilizar la estrategia de ampliación de la capacidad instalada es significativamente muy superior, pero implicaría un tiempo considerable para su implementación, debido a que su alcance es a largo plazo, es evidente el impacto positivo que tiene sobre el rendimiento y contribución a la utilidad.

La capacidad adicional por la compra de nuevos equipos no es suficiente para cubrir mayor demanda, entonces la decisión de comprar más máquinas se ve limitada por el espacio físico disponible, que necesariamente se debería pensar en la generación de una estrategia orientada a la ampliación de la planta física, que genere mayor espacio y se pueda así instalar más cantidad de puestos de trabajo.

Si se hace la experimentación es posible que se pueda suplir en mayor cantidad la demanda de los productos, pero pensando en el desarrollo de nuevos productos y procesos la capacidad sería insuficiente. La otra alternativa sería en pensar en la programación de un segundo turno lo que generaría un mayor rendimiento sobre los activos disponibles, claro está que se debe considerar el incremento de los costos para el desarrollo de las actividades coordinación y control de la nueva actividad productiva.

Al hacer la experimentación con planta física adicional se obtienen contribuciones mayores por ejemplo con una planta con capacidad de 2000 metros cuadrados, se lograría una mayor utilidad.

5. CONCLUSIONES

Para el desarrollo de las organizaciones es importante pensar en la ampliación de la capacidad productiva a corto, mediano y largo plazo.

En primera instancia con la adición de tiempo extra o la programación temporal de

turnos se puede responder a las necesidades a corto plazo; con la programación y proyección de nuevos turnos se responde a mediano plazo, claro está que implica la contratación de más personal para asignarlo al nuevo turno y definitivamente para obedecer a las necesidades y tendencias del mercado a largo plazo, es necesario pensar en la compra e instalación de nuevas máquinas y puestos de trabajo. Con la formulación de modelos de programación entera mixta se puede determinar y proyectar las necesidades de capacidad, así como percibir el beneficio que conlleva el desarrollo del sistema productivo.

Para la formulación de los planes de producción y llevar a cabo los procesos de gestión de los sistemas productivos, es de vital importancia determinar la capacidad de los recursos requeridos que intervendrán en la producción. El proceso de toma de decisiones afecta el desempeño de la organización reflejándose en indicadores de gestión, los cuales varían en función de la capacidad productiva. La orientación de la actividad productiva puede generar mejoramiento sobre algunos criterios de decisión, pero pueden afectar negativamente el desempeño de la organización al evaluarse en función de otros criterios. Por ejemplo en el intento de reducir costo se puede incurrir en la producción de bienes de calidad inferior, o generar niveles de producción baja y por tanto menor productividad. Para ampliar el concepto se puede consultar [21-24].

La determinación de elementos tales como el ocio productivo asociado a las variables de holgura en las restricciones de capacidad, los requerimientos de capacidad determinada a partir de la estimación de los recursos necesarios, traducido en la programación de horas extras o programación de más turnos, los porcentajes y grados de utilización de la capacidad, el grado de participación de la demanda potencial, los niveles de servicio, el equilibrio entre los recursos máquina y la fuerza laboral, la identificación de los recursos cuello de botella, y los costos asociados a la producción y la inactividad productiva entre otros son de gran importancia para el diseño y formulación de planes de producción, los

cuales se pueden obtener bajo un análisis de ampliación de la capacidad y a través de la interpretación de los resultados del problema de optimización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Noori y R. Radford. "Administración de Operaciones y Producción". Mc Graw Hill. 1997.
- [2] J. A. Domínguez Machuca et al. "Dirección de Operaciones, Aspectos Tácticos y Operativos en la Producción y los Servicios". Editorial Mc Graw Hill Interamericana de España. 1995
- [3] D. Kalenatic, C. López, L. González. "Modelo Integral de Producción en Empresas Manufactureras Colombia". 2006, ISBN: 9589784011 vol: 1, Ed. Kimpres.
- [4] K. Lockyer. "Production and Operation Management". Prentice Hall. 1992.
- [5] R. Chase, F. Robert Jacobs, and Nicholas Aquilano. "Operations Management for Competitive Advantage". Mc Graw Hill. 2005.
- [6] D. Kalenatic. "Modelo Integral y dinámico para el análisis, planeación, programación y control de las capacidades productivas en empresas manufactureras". Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Centro de Investigaciones y desarrollo científico. 2001.
- [7] I. Chiavenato. "Iniciación a la planeación y control de la producción". México : McGraw-Hill, 1993.
- [8] K. Lee & R. Larry. "Administración de Operaciones". Editorial Prentice Hall, 5ta. 2001.
- [9] D. Kalenatic, C. López, L. González. "Modelos de Medición, Análisis, Planeación y Programación de Capacidades en un Contexto de Múltiples Criterios de Decisión Colombia". *Revista Ingeniería*. ISSN: 0121-750X, 2005 vol:2-2005 págs: 15 - 25
- [10] H. Lewis et al. "Master scheduling in assemble-to-order environments: a capacitated multi-objective lot-sizing model, Decision sciences". Jan/Feb 1992; 23, 1 ABI/INFORM Global. Pg. 21.
- [11] M. Brucoleri, G. Lo Nigro, S. Noto la Diega, P. Retina, C. Perrone. "A DSS for strategic planning". En: Design of Advanced Manufacturing Systems: Models for Capacity Planning in Advanced Manufacturing Systems. Andrea, M. and Quirico, S. (Eds.). Springer, 2005.
- [12] F. S. Hillier, G. J. Lieberman. "Introduction to Operations Research". Eighth Edition. Mc Graw Hill. 2004.
- [13] W. L. Winston. "Investigación de Operaciones". Cuarta Edición. Editorial THOMSON. 2005.
- [14] D. Kalenatic, C. López, L. González. "Modelo de planeación de capacidades utilizando programación fraccional lineal en un contexto de múltiples criterios de decisión Colombia". *Revista Ingeniería*. ISSN: 0121-750X, 2006 vol:11 fasc: 2 págs: 48 - 60
- [15] S. Berman & S. Hood. "Capacity optimization planning system CAPS". Interfaces. Sep/Oct 1999, 29, 5 ABI/INFORM Global Pg.31.
- [16] S. Karabuk & D. Wu. "Coordinating strategy capacity planning in the semiconductor industry". Operation Research Nov/Dec 2003, 51,6 ABI/INFORM Global Pg.839.
- [17] H. Sherali, K. Stachus, J. Huacuz. "An integer programming approach and implementation for an electric utility capacity planning problem with renewable energy sources". Management science, Jul 1987, 3, 7 ABI/INFORM Global Pg. 831.
- [18] B. Balachandran et al. "On the efficiency of cost-based decision rules for capacity planning". The Accounting review; Oct 1997, 72,4; ABI/INFORM Global Pg. 599.
- [19] D. Kalenatic, C. López, L. González. "Modelos de Medición, Análisis, Planeación y Programación de Capacidades en un Contexto de Múltiples Criterios de Decisión Colombia". *Revista Ingeniería*. ISSN: 0121-750X, vol:2-2005 fasc: 1 págs: 15 - 25.
- [20] R. Leachman & T. Carmon. "On capacity modelling for production planning with alternative machine types". IIE transactions September 1992, Vol 24, No 4.
- [21] Y. Hung & G. Cheng. "Hybrid capacity modelling for alternative machine types in linear programming production planning". IIE Transactions, Feb 2002, 34,2 ABI/INFORM Global Pg. 157.
- [22] D. Paraskevopoulos et al. "Robust capacity planning under uncertainty management science". Jul 1991, 37,7 ABI/INFORM Global Pg. 787.
- [23] J. McClain et al. "Efficient solutions to a linear programming model for production scheduling with capacity constraints and no initial stock". IIE Transactions Jul 1989, 21,2 ABI/INFORM Global Pg.144.
- [24] T. Fahringer & M. Siddiqui. "Grid Resource Management: On-demand Provisioning, Advance Reservation, and Capacity Planning of Grid Resources (Lecture Notes in Computer Science/Theoretical ... Science and General Issues)". Springer 2009.

Dusko Kalenatic

Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de Las Villas Marta Abreu, Santa Clara. Especialista en Ingeniería de Producción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Especialista del Instituto de Periodismo Yugoslavo. Economista de la Escuela Superior de Economía, Belgrado. Ingeniero en Organización de Trabajo de la Universidad de Belgrado. Profesor e Investigador del grupo en sistemas logísticos de la Universidad de la Sabana.

dusko.kalenatic@udistrital.edu.co

César Amilcar López Bello

Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes. Especialista en Ingeniería de Producción, Universidad Distrital. Ingeniero Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Profesor Investigador grupo sistemas logísticos de la Universidad de la Sabana. Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería Universidad Distrital. Investigador grupo MMAI de la Universidad Distrital.

clopezb@udistrital.edu.co. cesar.lopez@unisabana.edu.co

Leonardo José González Rodríguez

Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes. Especialista en Ingeniería de Producción, Universidad Distrital. Ingeniero Industrial, Universidad Distrital. Director Grupo de Investigación en Sistemas Logísticos, Universidad de la Sabana.

Leonardo.gonzalez1@unisabana.edu.co